

## ГЕОМЕХАНІКА

УДК 622.272

А.И. Крючков, к. т. н., доцент (НТУУ «КПИ»)

**ФОРМИРОВАНИЕ УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ НА РЕЗЦАХ ПРИ РАБОТЕ  
КОМБАЙНА WIRTGEN 2200 SM**

A.I. Kruchkov, Ph.D, associate professor (NTUU «KPI»)

**FORMING OF CUTTING EFFORT ON CUTTER DURING WORK OF  
COMBINE OF WIRTGEN 2200 SM**

*Рассмотрены процесс и его модель формирования усилия резания на резцах комбайна WIRTGEN 2200 SM с использованием принципа наименьшего действия и метода  $N$  – характеристик. Показано, что процесс формирования усилия аналитически может быть представлен профильтрованным пуассоновским процессом. Установлено, что минимальная дисперсия усилия резания на резцах достигается при автоколебательном режиме развития трещин. При этом обеспечивается минимальная энергоемкость разрушения.*

**Ключевые слова:** *резец, усилие резания, гаусовский процесс, автоколебательный режим, минимальная энергоемкость.*

*Розглянуто процес і його модель формування зусилля різання на різцях комбайна WIRTGEN 2200 SM з використанням принципу найменшої дії і методу  $N$  - характеристик. Показано, що процес формування зусилля аналітично може бути представлений профільтрованим пуасонівським процесом. Встановлено, що мінімальна дисперсія зусилля різання на різцях досягається при автоколивальному режимі розвитку тріщин. При цьому забезпечується мінімальна енергоємність руйнування.*

**Ключові слова:** *різець, зусилля різання, гаусовський процес, автоколивальний режим, мінімальна енергоємність.*

*A process and its model of forming of cutting effort is considered on the cutter of combine of WIRTGEN 2200 SM with the use of principle of the least action and method of  $N$  - descriptions. It is shown that the process of forming of effort analytically can be presented by the filtered Gaussian process. It is set that minimum dispersion of cutting effort on cutters is reached at an self-oscillation regime of development of cracks. The minimum power intensity of destruction is thus provided.*

**Key words:** *cutter, cutting effort, Gaussian process, self-oscillation regime, minimum power intensity.*

**Введение.** При разрушении комбайном WIRTGEN 2200 SM массива скальных пород проблемным является снижение импульсных нагрузок на исполнительный орган комбайна, что требует знания основных закономерностей и зависимостей формирования усилий на резцах при вращении барабана.

**Цель статьи.** В связи с этим целью данной статьи является установление основных закономерностей и зависимостей при разрушении горного массива резцами барабанного исполнительного органа комбайна.

**Материал и результаты исследований.** На основании экспериментальных данных с использованием принципа наименьшего действия и метода  $N$  – характеристик связь формирования импульса нагрузки на резце с особенностями развития трещин при отделении куска скальной породы от массива можно представить следующим образом.

При нагружении с постоянной скоростью резцом элемента массива с трещиной в инкубационном периоде начинает расти зона деформаций у вершины трещины. При критическом значении длины этой зоны в момент  $t_a$  начинается медленный устойчивый рост трещины со скоростью 2...5 м/с. В момент ее трогания нагрузка кратковременно снижается. При достижении движущей силой трещины значения  $J_C = N_C$  (рис. 1, т. С), начинается период ее неустойчивого быстрого развития со скоростью 150...200 м/с. Следовательно, формирование переднего фронта импульса нагрузки на резце при единичном сколе происходит при устойчивом росте трещины, а заднего – при неустойчивом (рис. 2а).

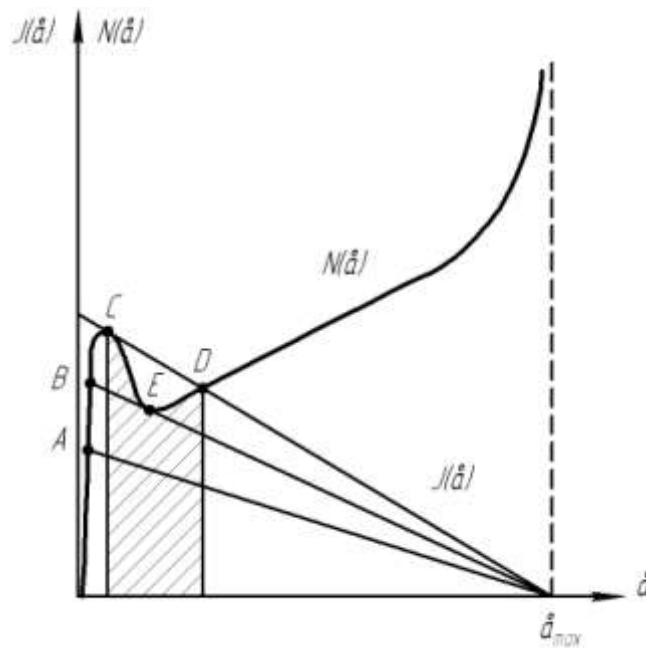


Рис. 1. Метод  $N$  – характеристик в динамике развития трещин.

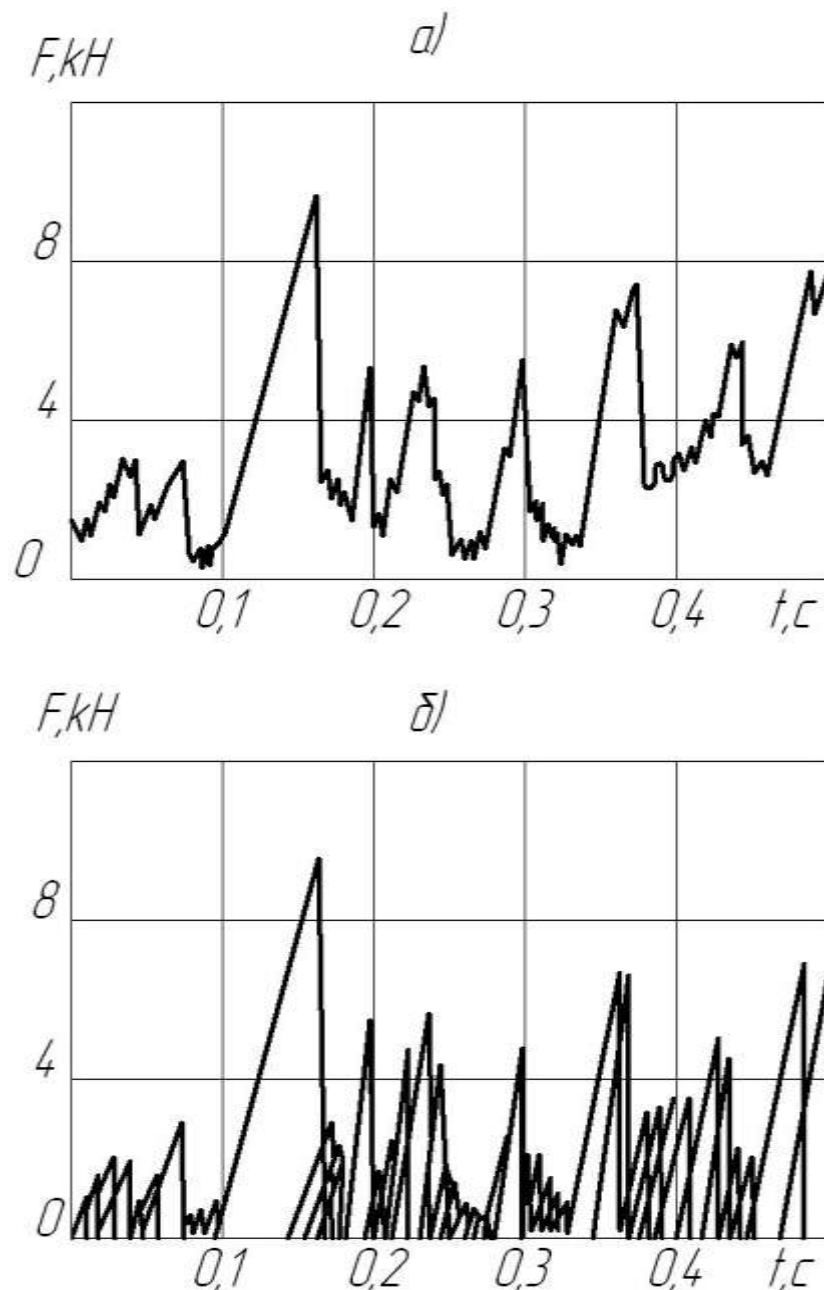


Рис. 2. Усилие резания на передней грани резца ЗРІ-80 а) и его модель б).

Реальная диаграмма усилия резания на передней грани резца представляет собой случайный процесс, состоящий из суммы элементарных импульсов нагрузки, обусловленных образованием, развитием и слиянием серии трещин в массиве, что приводит к одновременному отделению от массива и дроблению нескольких элементов породы. В целом этот случайный процесс характеризуется количеством и расположением во времени импульсов нагрузки, их амплитудой, формой и длительностью. Рассматриваемый случайный процесс формирования усилия на передней грани резца аналитически может быть представлен профильтрованным пуассоновским процессом:

$$Z_n(t) = \sum_{i=1}^n Z_1(t-t_i). \quad (1)$$

Тогда математическое ожидание и дисперсия суммарного усилия резания на передней грани резца определяется по формулам:

$$M[Z_n(t)] = \lambda \bar{z} \int_0^{\tau_m} \tau d\tau, \tau = t - t_1; \quad (2)$$

$$\ddot{A}[Z_n(t)] = \lambda \ddot{A}_z \int_0^{\tau_m} \tau^2 d\tau. \quad (3)$$

Плотность вероятности распределения усилия резания на резце  $\omega(Z_n)$  описывается гамма-распределением, что подтверждается экспериментально.

При увеличении степени измельчения горной породы, то есть с увеличением частоты сколов (интенсивности трещинообразования), профильтрованный процесс Пуассона асимптотически стремится к гауссовскому процессу с плотностью распределения

$$\omega[Z_n(t)] = (2\pi\sigma_z^2)^{-0.5} \exp\left[-(Z_n - \bar{Z}_n)^2 / 2\sigma_z^2\right], \quad (4)$$

что совпадает с прямыми экспериментальными данными.

Таким образом можно утверждать, что усилие резания на передней грани резца исполнительного органа комбайна описывается гауссовским процессом.

Скачкообразный режим развития трещин в массиве, а, следовательно, и импульсный характер нагрузки на резцах, обусловлены своеобразной зависимостью сопротивления материала развитию трещин, то есть видом  $N$  – характеристики (рис. 1.). Скачок скорости в т. С приводит к резкому снижению сопротивления развитию трещины от значения  $N_C$  до значения  $N_D$ , что вызывает соответствующее снижение движущей силы трещины от  $J_C$  до  $J_D$ . На резцах этот процесс ощущается как снижение сопротивления массива, а следовательно, происходит резкое снижение усилия резания. Аналогичный процесс наблюдается и в конце периода развития трещины при сколе элемента массива. Таким образом на резце формируется типичный импульс нагрузки. Амплитуда его тем больше, чем короче трещина. Увеличивая начальную длину трещин, можно снизить амплитуду колебаний усилия резания на резцах. Из этого анализа следуют выводы:

при переходе к быстрому разрушению (неустойчивый режим развития трещин) всегда наблюдается разгрузка резца;

аналогичную реакцию вызывает скол элемента массива независимо от режима развития трещины;

колебания усилия резания на резцах обусловлены, в первую очередь, процессом разрушения и избавиться от них невозможно – речь может идти только об уменьшении амплитуды колебаний.

Важной характеристикой любого процесса разрушения является его удельная энергоёмкость. Под удельной энергоёмкостью разрушения мы подразумеваем отношение затраченной энергии при разрушении массива к площади вновь образованной поверхности частиц разрушенного массива, так

как поверхностная энергия и энергия пластических деформаций в рамках концепций квазихрупкого разрушения пропорциональны поверхности трещин. Энергия, идущая на развитие отдельной трещины определяется по  $N$  – характеристике данной горной породы (рис. 1)

$$E = \int_0^{\tau} N(\dot{S}) \dot{S} dt = b \int_0^{\tau} N(\dot{a}) \dot{a} dt, \text{ Дж.} \quad (5)$$

Для единицы объема с  $n$  трещинами удельная энергоемкость разрушения определяется как

$$H = \frac{E}{S} = \frac{b \sum_{i=1}^n \int_0^{\tau} N(\dot{a}_i) \dot{a}_i dt}{b \sum_{i=1}^n \int_0^{\tau} \dot{a}_i(t) dt}. \quad (5)$$

Для развивающихся трещин, учитывая эффект стабилизации скорости и кратковременность процесса, принимаем  $\dot{a} = const$ . Учитывая ранее приведенную приближенную зависимость  $N(\dot{a}) = A_0 + A_1 \dot{a}$  (средняя часть  $N$  – характеристики) предыдущее выражение запишем в виде:

$$H = \frac{nb(A_0 + A_1 \dot{a}) \int_0^{\tau} \dot{a} dt}{nb \int_0^{\tau} \dot{a} dt} = A_0 + A_1 \dot{a}, \quad (6)$$

то есть,  $N$  – характеристика сопротивления материала развитию трещины является ничем иным, как удельной энергоемкостью разрушения при различной скорости трещин.

Так как увеличение скорости трещин всегда связано с увеличением удельных энергозатрат (рис. 1.), то наиболее рациональным режимом трещинообразования с точки зрения минимизации удельной энергоемкости разрушения, является режим, при котором скорость трещин от значения  $\dot{a}_A$  как можно быстрее снизится до величины  $\dot{a}_E$ . Однако участок  $DE$  на  $N$  – характеристике является зоной неустойчивого развития трещин и дальнейшее снижение скорости трещины приведет практически к ее остановке. Увеличение внешней нагрузки снова вызывает аналогичный скачок скорости трещины, то есть возникнут автоколебания скорости развития трещин.

Такой режим возможен при условии, когда в зону разрушения будет поступать потенциальная энергия упругих деформаций, недостаточная для стабилизации скорости трещин после скачка. В противном случае энергоемкость разрушения выше, чем в автоколебательном режиме.

Кроме этого, амплитуда колебаний усилий резания на резце в автоколебательном режиме также минимальна, так как минимальна дисперсия суммарной движущей силы, то следует непосредственно из предыдущего анализа и вида рабочего участка  $N$  – характеристики. Минимальная дисперсия

усилия резания на резцах будет при автоколебательном режиме развития трещин, что соответствует минимальной энергоёмкости разрушения.

### **Выводы**

1. Сопротивление горной породы развитию трещин описывается  $N$  – характеристикой, физически представляющей собой энергоёмкость разрушения породы при различной скорости развития трещин. Траектория и скорость развития трещин определяются на основе использования принципа наименьшего действия и метода  $N$  – характеристики.

2. В условиях объёмного сжатия и высокой концентрации упругой энергии в горном массиве непосредственно под резцом, трещины, независимо от их конфигурации и размеров, развиваются одновременно и к поверхности массива. Это приводит к местному измельчению материала, образованию уплотнённого ядра и снижению КПД разрушения до 2...5 %.

3. Вне зоны уплотнённого ядра главное напряжение  $\sigma_3$  становится растягивающим, что создает условия для быстрого развития трещины максимальной длины в глубь массива и образованию элементарного скола. При этом передний фронт импульса нагрузки на резце формируется в период устойчивого развития трещин со скоростью 1...3 м/с, а задний – при скачке скорости до 150...200 м/с, что приводит к колебаниям усилия резания на каждом резце и на исполнительном органе в целом. Аналитически такие колебания описываются случайным гауссовским процессом, что используется при моделировании скорости подачи комбайна.

4. Снижение дисперсии усилия резания на резцах до минимальной величины достигается при автоколебательном режиме развития трещины. При этом обеспечивается минимальная энергоёмкость разрушения при прочих равных условиях. Создание автоколебательного режима развития трещин возможно путем импульсного нагружения с частотой 2...5 кГц.

*Статья поступила в редакцию 10.04.2014 г.*